

CPM・Nd:YAG レーザーの FCM 強調発振 (3)

田尻 昇* 宇井 克行** 有谷 秀明**
神本 光昭** 北嶋 巖**

Enhanced FCM of a Nd:YAG Laser in CPM Operation (3)

Noboru TAJIRI, Katsuyuki UI, Hideaki ARIYA,
Mitsuaki KAMIMOTO and Iwao KITAZIMA

(Received Feb. 29, 2000)

Feedback controled mode-locking(FCM) is an effective method to enhance flash-lamp pumped CPM(Colliding pulse mode-locking)・Nd:YAG laser and to reduce the laser pulse width. Generally, the pulse repetition rate of a passively mode-locked laser is represented by the fundamental mode-locking frequency Δf , which is determined by the cavity length. As a method of increasing the mode-locking frequency, we set the saturable absorber on 1/4 or 1/6 of cavity length. In this case, the multiple mode-locking frequency is $4\Delta f$, $6\Delta f$, i.e. pulse repetition rate is 500MHz, 750MHz, respectively. In these situations, the pulse train was stretched up to 1200ns, and the pulsewidth was shortened down to 2.6ps in sech^2 shape, while the pulse energy was still $5\mu\text{J}$.

Key Words : Nd:YAG Laser, CPM, FCM, 750MHz Multiple Pulses, 2.6ps Pulse-Width

1 はじめに

Nd:YAG レーザーのモード同期は Table 1 に示すように様々な方法が考案・適用されている。1970 年前半から可飽和吸収色素を用いた受動モード同期発振が行われている[1, 2]。H.Vanherzeels ら[3]により線形共振器に antiresonant ring を結合し CPM 発振を行い 16ps のパルス幅を得ている。また、No.9860 を用いた受動モード同期において可飽和吸収色素の効果を高めるため、Feedback Controled Mode-locking (FCM) を併用しパルス幅 10ps[4]、9.5ps[9]を得ている。一方、共振器内にモードロッカーを用いず、第二高調波を発生させる特殊な方法でモード同期発振が実現されている[5, 6, 12]。他方、可飽和吸収色素と光学変調器を併用し、受動、能動の長所を有したハイブリッドモード同期発振も行われている[7]。

*大学院工学研究科電子工学専攻

**電子工学科

H.Y.Lyu ら[8]は主共振器と光ファイバーで構成される外部共振器の干渉的な相互作用による Additive Pulse Mode-locking (APM)により 6ps のパルスを得ている。G.S.He ら[10]は Coupled Cavity Mode-locking (CCM)において、主共振器長と外部共振器長の比よりパルスの多重化を行い、基本周波数の3倍に当たる繰り返し 738MHz、パルス幅 500ps を得ている。U.Keller ら[11]はモード同期の安定性、再現性を高めるため、半導体可飽和吸収ミラー (Semiconductor Saturable Absorber Mirror: SESAM) と Q スイッチを併用し 6.8ps の安定したパルスを得ている。この SESAM は、低温 MBE 法を用いて制作されており、GaAs 基盤の上に $25 \times \text{AlAs/GaAs}$ の Bragg Mirror を積層し、更に AlAs と GaAs の間に可飽和吸収層としての InGaAs で構成されている。我々の研究室では 2CPM-FCM で 4ps[13]、CPM-FCM で 3ps[14]、2.8ps[15]を得ると共にパルスの多重化を行っている。

Table 1 The history of mode-locked Nd:YAG laser.

year	Worker	Type	Pulse width (ps)	Ref.
1975	H.AL-Obaidi	passive	30	1)
1980	H.Graener	passive-Etalon	12	2)
1981	H.Vanherzeels	ARR CPM	16	3)
1987	G.Angel	FCM	10	4)
1988	K.A.Stankov	NDM	100	5)
1990	T.F.Carruthers	NDM	11	6)
1990	A.Del.Corno	Active-passive	10	7)
1990	H.Y.Lyu	APM	6	8)
1992	A.Agensi	FCM	9.5	9)
1993	G.S.He	CCM	500	10)
1994	U.Keller	passive	6.8	11)
1995	I.Buchvarov	NDM	35	12)
1996	I.Kitazima	2CPM+FCM	4	13)
1997	I.Kitazima	CPM+FCM	3	14)
1999	I.Kitazima	CPM+FCM	2.8	15)

2 実験原理

2-1 CPM 法の原理

CPM 法は、可飽和吸収色素を用いる一般的な受動モード同期の理論を改変し、可飽和吸収色素セル(以下、色素セル)を反射鏡に密着せずにある間隔で挿入する方法である。このモード同期機構は、共振器内に2本以上の対向するパルスを色素セルの中で衝突させ、パルス幅短縮効果を高めたものである。

Fig.1 に共振器内におけるパルスの様子を示す。Fig.1(a)は色素セルを反射鏡に密着した一般的な受動モード同期である。この場合、共振器内のパルスは1本となり、パルス間隔は $2L/C$ (L:共振器

長、 C :光速)となる。Fig.1(b)、Fig.1(c)は色素セルを $L/4$ 、 $L/6$ に挿入した CPM 法である。この場合、共振器内のパルスは4本、6本となり、パルス間隔は $L/2C$ 、 $L/3C$ となる。このように CPM 法では、色素セルの挿入位置によりパルス本数を増やし、パルス間隔を縮小することができる特徴がある。可飽和吸収色素によるパルス幅短縮効果としては、(1)パルス前端部の吸収、(2)パルスを衝突重ね合わせることで、光強度増大に対応して色素濃度を高くすることができるため、パルス前端部における吸収の増大、及び色素の緩和時間が短くなることによるパルス後端部の吸収、(3)可飽和吸収色素が異常分散媒質であることによるロッドのチャージング補償、(4)色素セル内で形成される過渡的回折格子によるパルス後端部に散乱などの4つの効果が挙げられる。

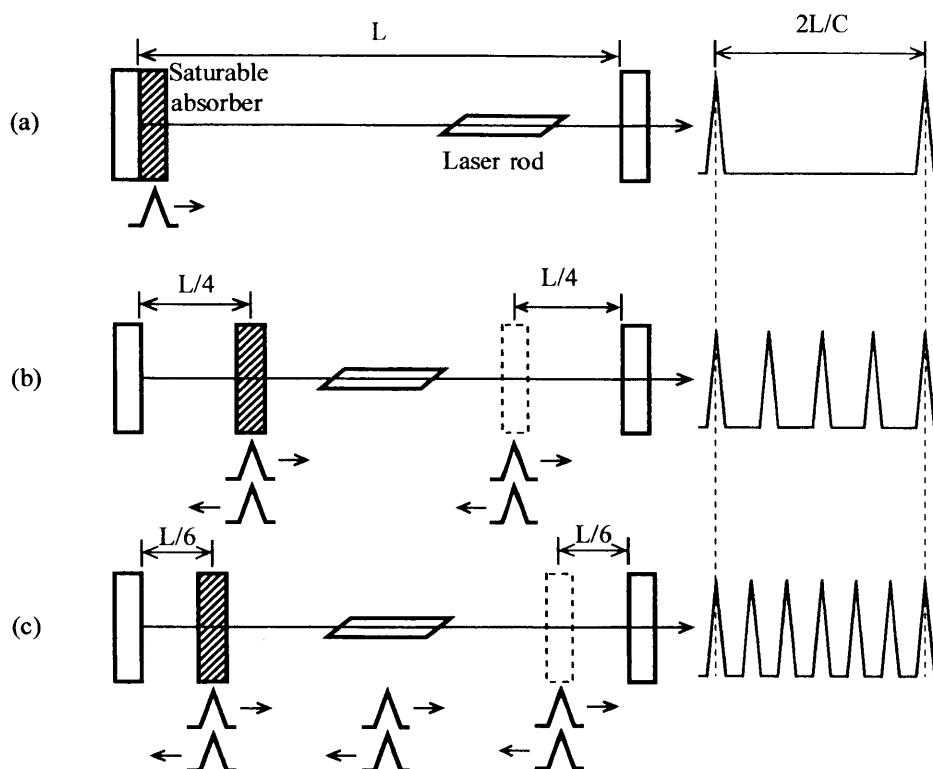


Fig.1 The schematic diagram of CPM using Fabry-Perot resonator. (a) Dye cell contacted on end mirror, (b) Dye cell position at $L/4$, (c) Dye cell position at $L/6$.

2-2 FCM 法の原理

FCM 法は共振器内に NFE (Negative Feedback Element) を設置し、Fig.2(a)のように NFE の二光子吸収による自己発散効果とピンホールの挿入による、エネルギーをフィードバック制御する方法である。これにより、利得の急激な立ち上がりを抑え、出力パルス列は Fig.2(b)のようなフラットで

長いものになる。そのためにパルスの色素セル通過回数が増加し、CPM 法のパルス幅短縮効果を高めることができる。また Fig.1 (b),(c) のように、出力鏡側においてもパルスが衝突し、光強度が高くなるため、NFE を衝突箇所を設置することで FCM 法の効果を増大する事ができる。

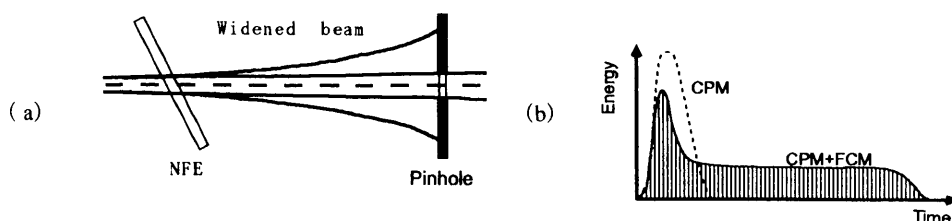


Fig.2 (a) Energy limiter based on self-defocusing in NFE.
(b) Envelope of pulse train.

3 実験と結果

3-1 CPM 発振

Fig.3 に CPM 法の実験系を示す。共振器長は 1.2mm のファブリペロー共振器であり、出力鏡、反射鏡には反射率がそれぞれ 80%, 100% のウェッジ型にカットしたものを使用した。Nd:YAG ロッドは、長さ 90mm, 直径 7mm のものを使用し、共振器の中央に配置した。このロッドの両端は、ブリュースター角 (61.2°) にカットされ、反射による損失を軽減している。励起光源には 2 本の Xe フラッシュランプを使用した。なお、印加電圧は 1500V、繰り返し 0.3Hz とした。熱によるロッドでの発振効率の低下、熱レンズ効果、Xe フラッシュランプの疲労を防ぐためにレーザーハウス内に冷却装置で冷却したイオン交換水をポンプにより循環させた。可飽和吸収色素には緩和時間 (3ps) の短い NK-3519 (日本感光色素) を使用し、その濃度として、以前のデータより最適濃度であった色素濃度 $4.5 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$ を使用し [16]、溶媒には 1-2 ジクロロエタンを用いた。色素の中心的な劣化を防ぐため、また安定化を目的とし、一定間隔での循環装置を作成し連続攪拌するものとした。色素セル厚は 0.5mm とし、反射鏡から光学的に共振器長の 1/4 及び 1/6 にブリュースター角 (56.4°) で挿入した。また、横モードを抑えるために色素セルと反射鏡の間に直径 2.5mm のピンホールを挿入した。パルス幅測定には、比較的容易に行える TPF 法を用いた。TPF の蛍光体として、Rh-6G エタノール溶液を使用した。このとき得られた蛍光パターンをフォトデンシトメーターでトレースした。また、出力の一部をバイブラナー光電管に導き 500MHz のアナログストレージスコープ (岩崎通信機 TS-8500) でモード同期パルス列を観測した。

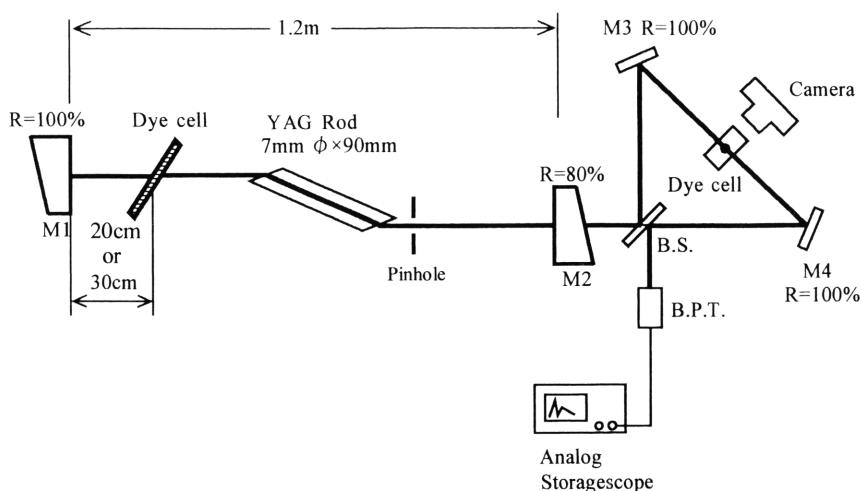


Fig.3 Experimental setup of CPM · Nd:YAG laser and TPF measurement.

Fig.4 に CPM 発振の TPF パターンを示す。このコントラスト比は 2.2 で、パルス幅は sech^2 波形で 14.7ps である。

Fig.5 (a) に色素セル設置位置 $L/4$ 、Fig.5 (a) に $L/6$ における CPM 発振の出力パルス列を示す。Fig.5 (a) から、パルス間隔は $2L/C$ の 4 分の 1 に当たる 2ns (500MHz)、パルス本数はパルス列幅 75ns から 36 本である。Fig.5 (b) から同様に、パルス間隔は 6 分の 1 にあたる 1.33ns (750MHz)、パルス本数はパルス列 90ns から 68 本であることがわかる。

Fig.6 (a), (b) に色素セル設置位置 $L/4$, $L/6$ におけるパルス幅のヒストグラムを示す。 $L/4$ においては、パルス幅は最短 12.6ps、平均 23.8ps、安定性 32% となり、 $L/6$ では最短 12.4ps、平均 19.1ps、安定性 25% であった。

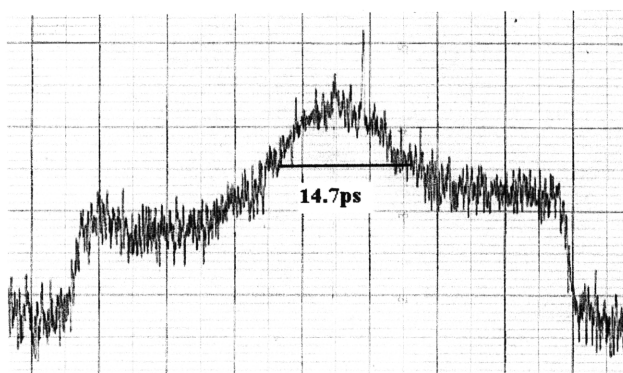
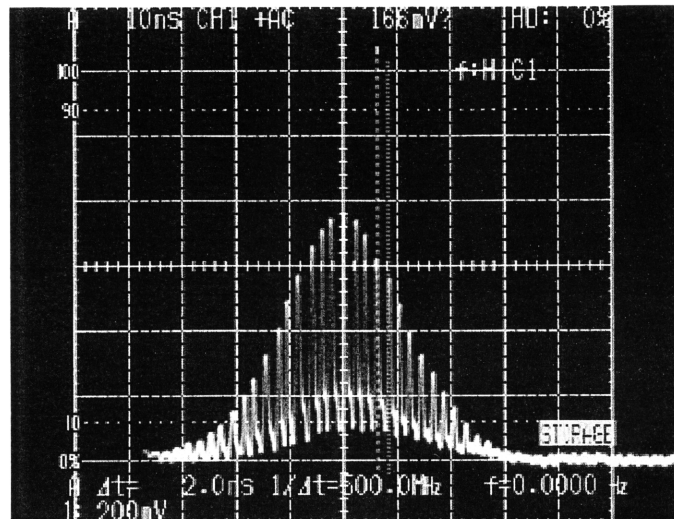


Fig.4 The pattern of TPF from CPM · Nd:YAG laser.

(a)



(b)

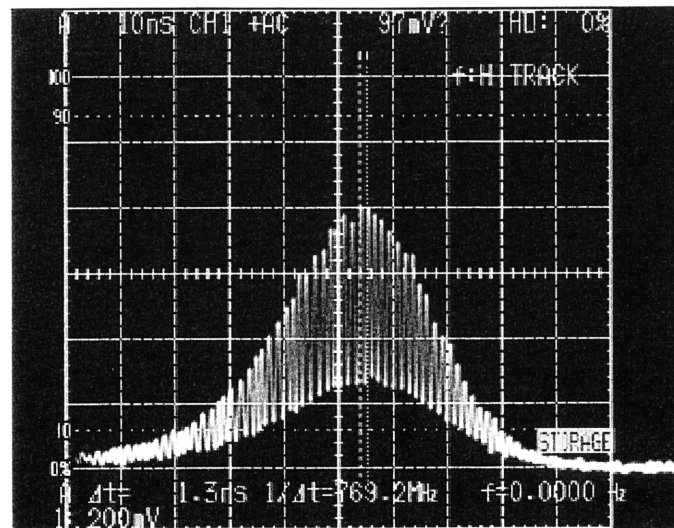
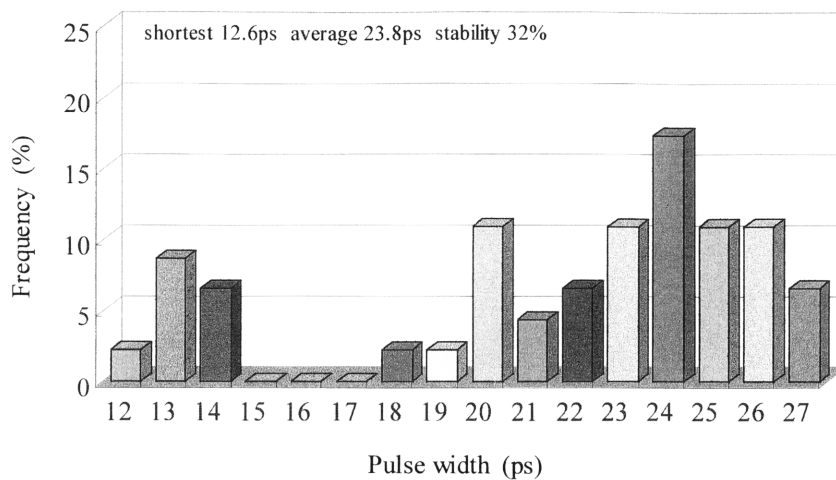


Fig.5 The output of CPM • Nd:YAG laser. The time scale is 10ns/div.

(a) Dye cell position at L/4, (b) Dye cell position at L/6.

(a)



(b)

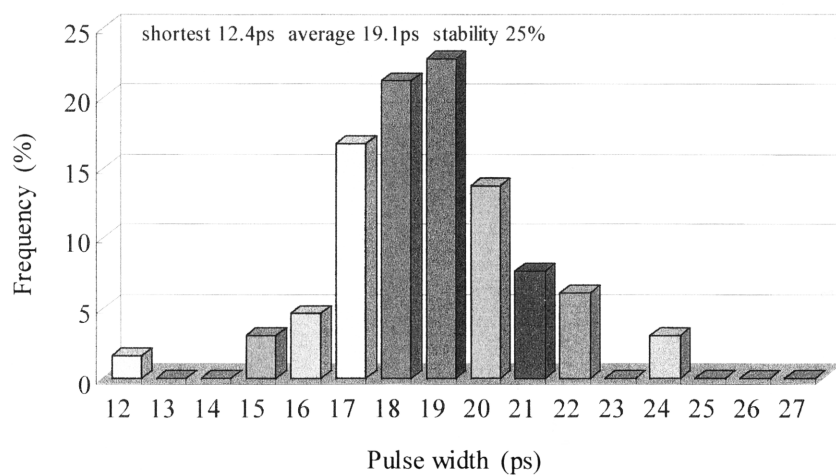


Fig.6 The histogram of the pulse width from CPM • Nd:YAG laser.

(a) Dye cell position at L/4, (b) Dye cell position at L/6.

3-2 CPM-FCM 強調発振

Fig.7 に CPM-FCM 法の実験系を示す。これは先の CPM 法の実験系に NFE として GaAs (undoped, [100] : $0.50\text{mm} \times 50 \phi$) をパルスが衝突する出力鏡 L/4 及び L/6 に設置したものである。色素濃度は最適濃度である $9.0 \times 10^{-5} \text{mol/l}$ [15] を用いた。

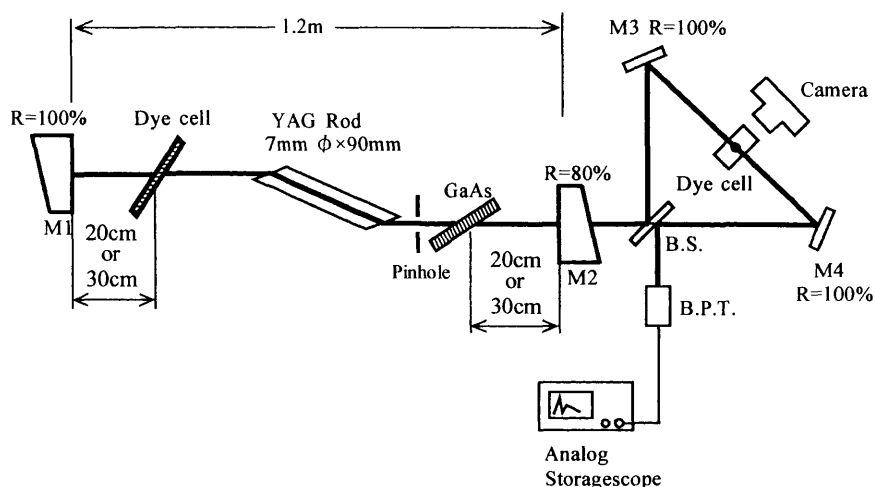


Fig.7 Experimental setup of CPM-FCM · Nd:YAG laser and TPF measurement.

Fig.8 に色素セル L/6 における CPM-FCM 強調発振のパルス列幅とパルス幅の依存性を示す。L/6 である 0mm の位置において平均パルス幅は最短となり、色素セル内でパルスが精確に衝突されていると考えられる。

Fig.9 に TPF のトレースパターンを示す。コントラスト比は 3.0、パルス幅は 2.6ps である。

Fig.10(a) に色素セル設置位置 L/4 における 300ns 後の出力パルス列を示す。この図より、モード間隔は 2ns (500MHz) であることがわかる。Fig.10(b) にパルス列全体を示す。パルス列幅は 1150ns であり、パルス本数は 575 本である。また、パルスの立ち上がりにおいて強度は不安定であるが、200ns 以降はフラットなパルス列となっている。

Fig.11 に色素セルを L/4 及び L/6 に設置した場合のパルス列幅とパルス幅の依存性を示す。これまでに、パルス列幅の拡張に伴ってパルス幅は短縮されていく [14], [15] という依存性が確認されている。しかし、Fig.11 (a), (b) からはこの依存性は観られない。一方パルス幅の安定性は、色素セル L/4 では 19%、L/6 では 13% となった。このときの最短パルス幅は 2.6ps であった。

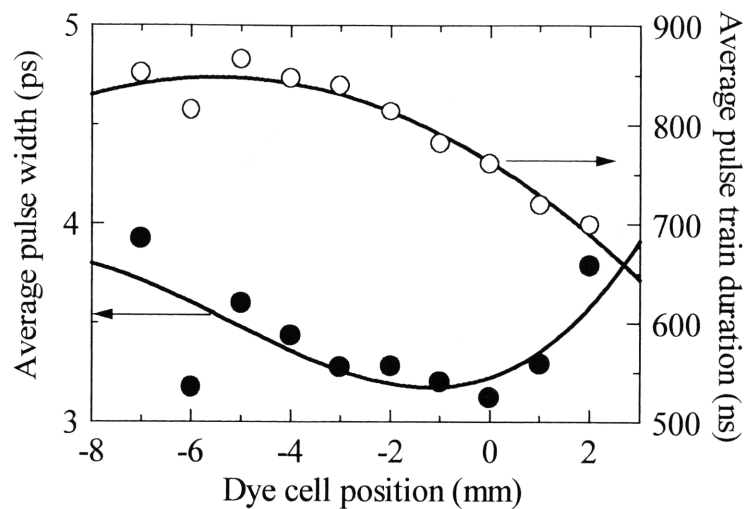


Fig.8 The dependence of the pulse width and the pulse train duration on the dye cell position.

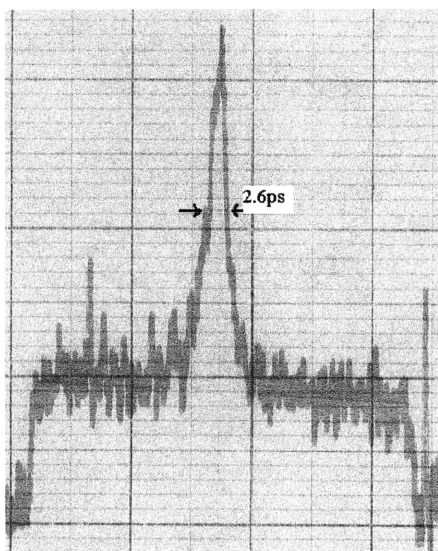


Fig.9 The trace pattern of TPF.

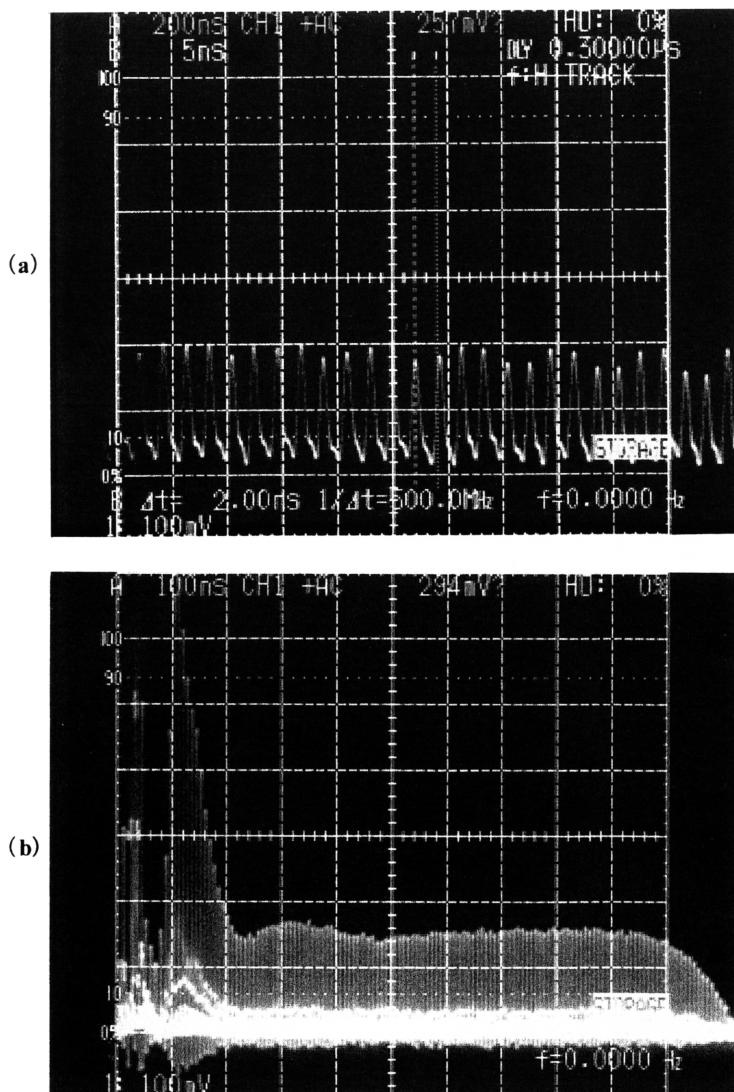


Fig.10 The output of CPM · Nd:YAG laser.

(a) Dye cell position at L/4: the time scale is 5ns/div, delay time is 300ns.

(b) Dye cell position at L/4: the time scale is 100ns/div.

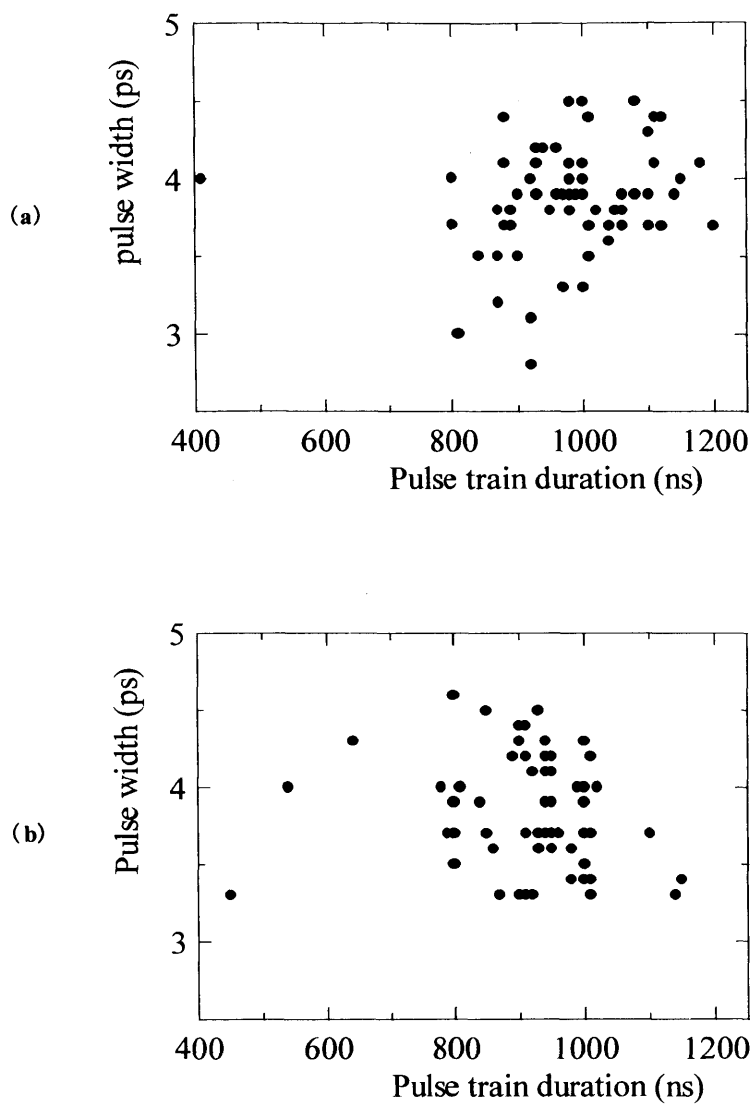


Fig.11 The dependence of the pulse width on pulse train duration from CPM-FCM · Nd:YAG laser.

(a) Dye cell position at $L/4$. (b) Dye cell position at $L/6$.

4 考察

CPM-FCM 強調発振では CPM 発振と比べると、パルス列は 10 倍以上に拡張された。さらに、パルス強度は非常にフラットとなった。これらは、パルスの立ち上がりの約 100ns 後から NFE とピンホールによる受動的なエネルギー制御が有効に働いたためと考えられる。この結果、パルスの色素セル通過回数が 100 回以上に増加し、パルス幅は最短 2.6ps まで短縮することができた。ところがパルス列幅 800ns 以上では、以前に観測されたパルス列幅とパルス幅の大きな依存性はなくなった。これは、パルスの色素セル通過回数 100 回程度で、可飽和吸収色素のパルス幅短縮効果が飽和したためと考えられる。つまり、可飽和吸収色素の緩和時間にパルス幅が制限されていることを意味すると考えられる。

色素セルの設置位置におけるパルス幅については、CPM 発振、及び CPM-FCM 強調発振共に最短パルス幅に大きな相違はみられなかったが、安定性に関しては、L/6 の方が高くなった。この要因として、パルス本数が増加することで、1 ショット毎の不安定さが分散され、1 パルス当たりでは小さくなったためと考えられる。

5 まとめ

Table2 The pulse width and the pulse train duration with CPM-FCM Nd:YAG laser.

		pulse train duration (ns)		pulse width (ps)	
		longest	average	shortest	average
CPM	L/4	75	75	12.6	23.8
	L/6	90	90	12.4	19.1
CPM-FCM	L/4	1200	1000	2.6	3.9
	L/6	1170	920	2.6	3.7
		repetition rate (MHz)	stability of pulse width (%)		
CPM	L/4	500	32		
	L/6	750	25		
CPM-FCM	L/4	500	19		
	L/6	750	13		

今回、色素セルの設置位置 L/4 と L/6 において、CPM 発振と CPM-FCM 強調発振を行った。これらの研究結果を Table.2 に示す。色素セルを L/4 から L/6 に設置することで、750MHz の高繰り返しパルス列が得られた。またパルス幅の安定性は、CPM 発振では 25%、CPM-FCM 強調発振では 13% となり、多少の改善が行えた。

6 今後の課題

現在では、高安定な超短パルスを得るためにはカー効果を利用する KLM (Kerr Lens Mode-locking) 法が主流となっている。一方、可飽和吸収色素による CPM 法では高安定性を求めることは難しい。ところが、近年、液体の可飽和吸収色素にかわる半導体の可飽和吸収鏡 (SESAM: Semiconductor Saturable Absorber Mirror) の研究が盛んに行われている [17, 18]。一般的な SESAM は化合物半導体 (GaAs) 基盤上に、半導体製 QWM 反射鏡として $\lambda/4$ 高屈折率層 (GaAs) と $\lambda/4$ 低屈折率層 (AlAs) を繰り返し、さらにその上に可飽和吸収層 (InGaAs) が積層される構造となっている [19]。このような SESAM はフェムト秒からピコ秒の様々な mode-locked laser に適用されている。これに伴って、CPM 法の安定性が大きく改善される可能性がある。

Nd:YAG レーザーのスペクトル幅 0.67nm から求まる理論限界パルス幅は 1.8ps であり、今回得られた最短パルス幅 2.6ps と非常に近い。今後は、さらに安定性を高めるため、可飽和吸収色素を GaAs を基板とする半導体可飽和吸収体に変更することで、安定性を飛躍的に高めることが出来ると考えられる。また、モードロッカーとしての可飽和吸収色素とネガティブフィードバック素子としての GaAs を一体化することができるならば、更に共振器の簡略化が行えると考えられる。

参考文献

- [1] H.Al-Obaidi, R.J.Dewhurst, G.A.Oldershaw, S.A.Ramsden: Optics.Comm. 14 (1975) 216.
- [2] H.Graner, A.Laubereau: Optics.Comm. 37 (1981) 138.
- [3] H.Vanherzeels, J.L.Van Eck, A.E.Siegman: Appl.opt. 20 (1981) 3484.
- [4] G.Angel, R.Gagel, A.Laubereau: Optics.Comm. 63 (1987) 259.
- [5] K.A.Stankov, J.Jethwa: Optics. Comm. 66 (1988) 44.
- [6] T.F.Carruthers, I.N.Dulling III: Opt.Lett. 15 (1990) 804.
- [7] A.Del.Corno, G.Gabetta, G.C.Reali, V.Kubesek, J.Marec: Opt.Lett. 15 (1990) 734.
- [8] L.Y.Lyu, J.M.Huxley, E.Plppenn, H.A.Haus: Opt.Lett. 15 (1990) 553.
- [9] A.Agens, A.Del.Corno, P.Di.Trapani, G.C.Reali, J.C.Diels, C.Y.Yen, X.M.Zhao, V.Kubecek: IEEE.Quantum.Electron. QE-28 (1992) 710.
- [10] Guang S.He, Yipng.Cui, Gen.C.Xu, N.Prasad: Optics.Comm. 96 (1993) 321.
- [11] U.Keller: Appl.Phys. 58 (1994) 347.
- [12] I.Buchvarov, S.Saltiel, S.Gagarskii: Optics.Comm. 118 (1995) 51.
- [13] I.Kitazima, K.Kudoh: Optics.Comm. 137 (1997) 290.
- [14] 加瀬谷浩康, 寺前英徳, 北嶋巖: 福井大学工学部工研報告 45 (1997) 173.
- [15] 田尻昇, 宇井克行, 北嶋巖: 福井大学工学部工研報告 47 (1999) 321.
- [16] 北嶋巖, 工藤康二, 加瀬谷浩康: レーザー研究 24 (1996) 1091.

- [17] U.Keller, K.J.Weingarten, F.K.Kärtner, D.Kopf, B.Braun, I.D.Yung, R.Fluck, C.Hönninger, N.Matuschek, J.Aus.der.Au: IEEE Selected Topics in Quantum Electron 2 (1996) 435.
- [18] S.Tsuda, W.H.Knox, S.T.Cundiff, W.J.Jan, J.E.Cunningham: IEEE Selected Topics in Quantum Electron 2 (1996) 435.
- [19] 鳥塚健二: レーザー研究 27 (1999) 744.